Vol. 20 No. 1
Jan., 2023

天 文 研 究 与 技 术
ASTRONOMICAL RESEARCH & TECHNOLOGY

第 20 卷 第 1 期
2023 年 1 月

DOI：

遮挡效应的太阳射电观测和仿真

耿立红[1]，苏 仓[1]，杜 静[1]，刘东浩[2]，颜毅华[1]，陈林杰[1]，王 威[1]

（1. 中国科学院国家空间科学中心空间天气学国家重点实验室，北京 100190；
2. 中国科学院国家天文台月球与深空探测研究部，北京 100101）

摘要：遮挡效应是多天线复杂系统设计一个重要考虑因素。国家重大科技基础设施项目子午工程二期建设完成后，明安图台站各类天线总数将达到 373 套。受限于测试场地、模型复杂度和计算量，特别是对电大尺寸障碍物的遮挡效应通常很难实测和预测。明安图台站太阳射电望远镜(Mingantu Solar Radio Telescope，MST)在 2017~2020 年 S/C/X 频段的观测数据显示以 20 m 天线和远方丘陵为障碍物的遮挡效应，并可分为天线、大气和丘陵 3 个不同特性区域。基于 ITU-R P. 526-15 建议书单刃峰绕射损耗预测方法，进行 20 m 天线反射面仿真建模和近似计算。观测和仿真的结果显示，绕射损耗随频率变化趋势基本一致，遮挡效应与波长、障碍物特性及其相对源和接收天线的距离和角度、接收设备的天线波束和动态范围等有关。

关键词：遮挡效应；太阳射电观测；子午工程二期；ITU-R P. 526-15；绕射损耗

中图分类号：P162.11 **文献标识码**：A **文章编号**：1672-7673(2023)01-0000-09

占地 378 亩、位于内蒙古正镶白旗的明安图野外科学观测研究站(简称明安图台站，东经 115°15′，北纬 42°12′，海拔 1 365 m)，是进行宽频带、高分辨率太阳射电辐射成像及频谱观测，开展太阳物理和空间天气研究，集观测、科研、科普和国际交流为一体的重要平台，国家重大科技基础设施“空间环境地基综合监测网”项目(简称子午工程二期)建设完成后，各类天线总数将达到 373 套。包括现有的 60 面 2 m 和 40 面 4.5 m 抛物面天线的明安图射电频谱日像仪[1](Mingantu Spectral Radioheliograph，MUSER)、40 个振子天线的甚低频观测设备[2]、3 m 抛物面天线的太阳射电望远镜[3]和 2 面 20 m 抛物面天线[4](图 1)，以及在建的 3 面 140 m×40 m 抛物柱面天线[5]、224 面振子天线和 2 m、4.5 m 和 16 m 抛物面天线各一，分属行星际闪烁监测仪、米波-十米波射电日像仪、超宽带太阳射电频谱仪和定标，组成复杂的电磁环境和天线布局，遮挡效应是这类多天线区域复杂系统设计的重要考虑因素之一。

受限于测试场地以及模型复杂度、计算量或精度[6-7]，遮挡效应特别对电大尺寸障碍物通常很难进行实测和预测。在明安图台站，太阳、3 m 太阳射电望远镜及两者间的西 20 m 天线和远方的丘陵，构成独特的遮挡效应实测系统。3 m 太阳射电望远镜在 2017~2020 年期间的太阳射电辐射观测数据，显示了以 20 m 天线和丘陵为障碍物的遮挡效应图像，并可分为天线、大气和丘陵 3 个不同特性区域。在遮挡损耗预测方面，基于国际电联无线电通信部门(Radio communication Sector of ITU，ITU-R)的 ITU-R P. 526-15 建议书[8](Propagation by diffraction)单刃峰绕射损耗预测方法，建立 20 m 天线反射面模型并作近似计算。

1 遮挡效应的太阳射电观测及数据处理

3 m 太阳射电望远镜工作在 S/C/X 频段[3]，S 频段还是空间天气预报中关键的 F10.7 指数观测频

基金项目：国家自然科学基金（12003049）；国家空间天气监测预警中心（国家卫星气象中心）项目（ZQC-H15080）；国家重大科技基础设施“空间环境地基综合监测网”国家发展改革委项目（发改高技〔2018〕296）资助.

收稿日期：2022-09-22；修订日期：2022-10-11

作者简介：耿立红，女，Email：genglihong@nssc.cac.cn.

段，波长 10.7 cm/6.6 cm/3.3 cm，双圆极化，3 m 口径抛物面天线半功率波束宽度分别约为 2.5°/1.5°/0.8°，经校准温度响应后，与日本 NoRP(Nobeyama Radio Polarimeter)多频点观测数据及国家空间天气监测预警中心 F10.7 数据比对[9]，S/C/X 频段绝对流量均方根误差分别为 2.7 sfu/5.7 sfu/20 sfu，相对误差为 4%/6%/8%。3 m 太阳射电望远镜在 2017~2020 年分别有 149、251、283 和 320 个有效观测天数。本文讨论被遮挡部分的观测数据处理过程。



图 1 明安图台站 20 m 天线和 MST 3 m 天线

Fig. 1 20 m antenna and 3 m antenna of MST in Mingantu Station

20 m 天线用于明安图射电频谱日像仪低频阵系统定标，通常处于朝天收藏状态，距离 3 m 太阳射电望远镜 104 m(图 2)，相对张角约 11°，对 3 m 太阳射电望远镜的遮挡发生于冬季下午低太阳轨道方向。图 3 为 2020 年 1 月 4 日单日有遮挡的太阳射电辐射流量观测曲线，时间分辨率 1 s，图中还可见 X 频段雷达干扰。图 4(a)为 2019 年第 300~365 天 4:00 pm~5:30 pm 多日有遮挡的 S 频段左旋观测数据，时间分辨率 1 min，图 4(b)为对应等高线图。连续的射电流量变化表明遮挡的规律性。

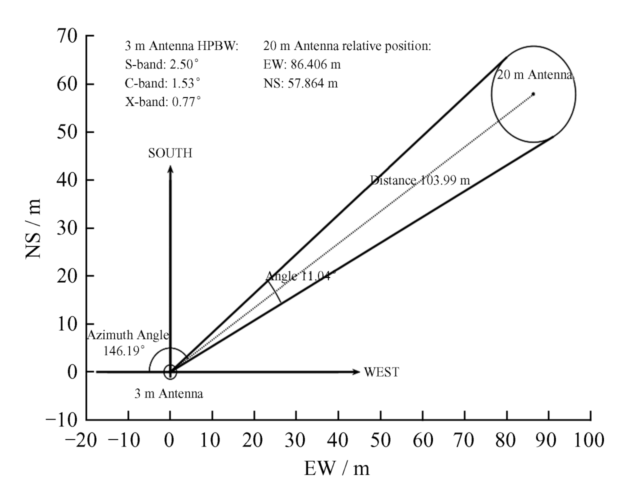


图 2 明安图台站 20 m 天线和 MST 3 m 天线相对几何位置关系

Fig. 2 Geometric positional relationship between 20 m antenna and 3 m antenna of MST in Mingantu Station

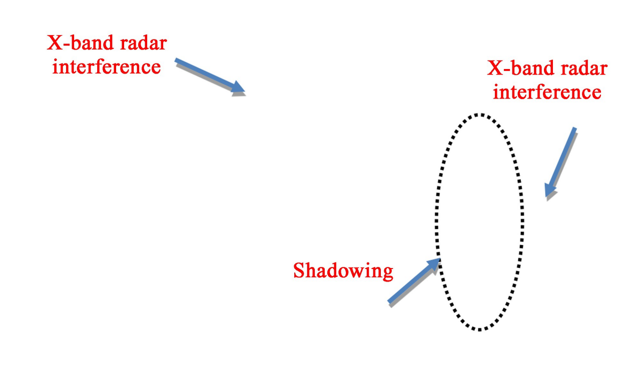


图 3 MST 3 频段左旋观测流量曲线(dB)(2020 年 1 月 4 日，时间分辨率 1 s)

Fig. 3 Observed solar radio flux (dB) of MST 3-bands (January 4, 2020, 1 s time resolution)

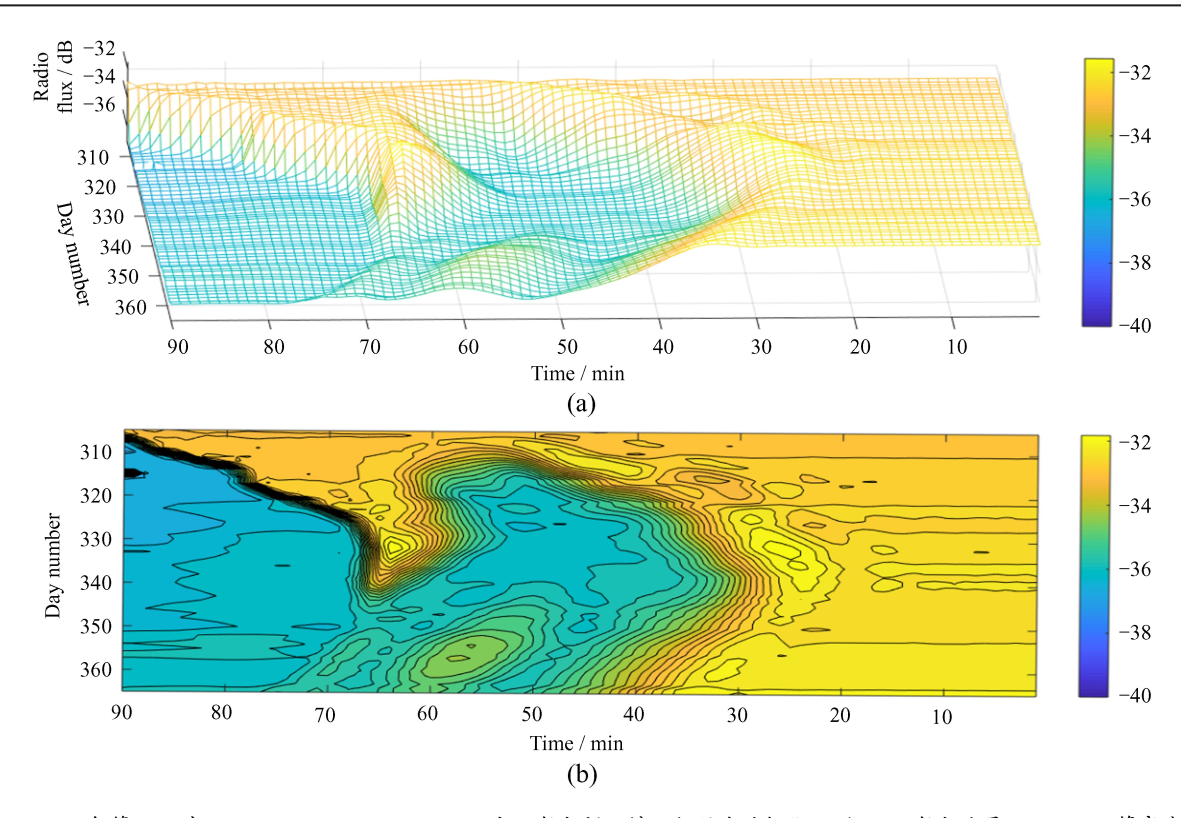


图 4　2019 年第 300 到 365 天 4：00 pm～5：30 pm 3 m 太阳射电望远镜 S 频段左旋极化观测。(a)射电流量(dB)；(b)等高线图

Fig. 4　Radio flux (a) and contour (b) of MST S-band Left-polarization observed data between 4：00 and 5：30 pm and dates from 300th to 365th of 2019

由于每年太阳运行轨迹并不重合，对 2017～2020 年观测数据进行合成处理。首先，把每天 3：00 pm 观测值作为参考值从当天观测数据中减去，消去太阳和背景射电辐射流量及温度变化影响，得到当日因遮挡产生的额外损耗，这里称之为遮挡损耗。然后，因 3 m 太阳射电望远镜为赤道式座架，观测时刻对应太阳时角赤纬坐标，把时角 37～73°、赤纬−23.44～−12.2°的角度范围划分 200×200 网格并用有效观测数据作插值，插值时舍去偏离较大的值，如雷达干扰；最后，得到赤道坐标系下 3 频段和双极化的总遮挡损耗(dB)，图 5 显示了其中 S 频段左旋极化的遮挡情况。

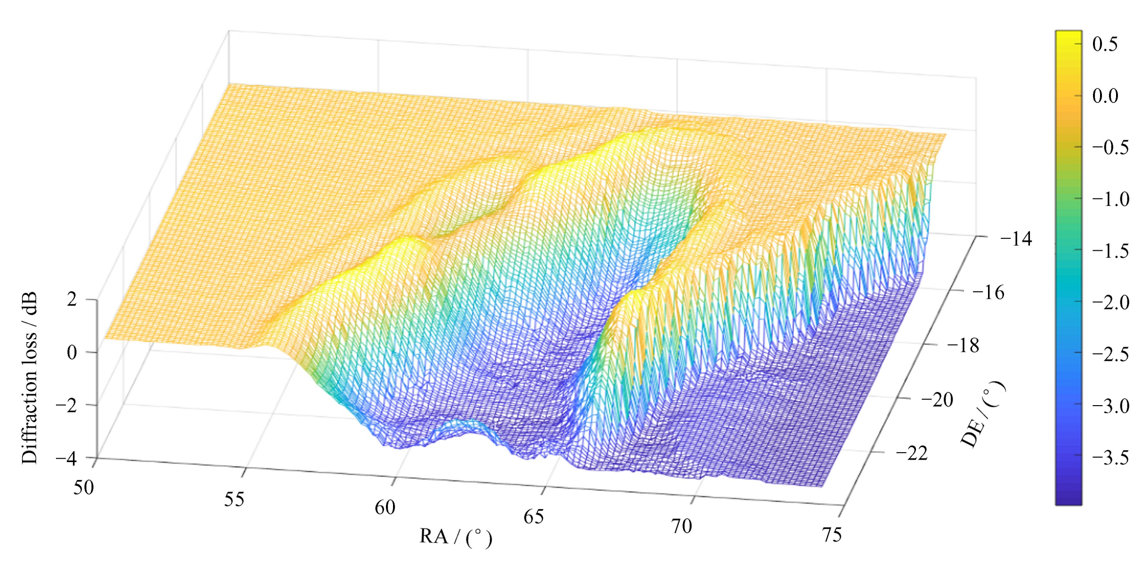


图 5　赤道坐标系下 3 m 太阳射电望远镜 S 频段左旋极化的遮挡损耗

Fig. 5　Observed diffraction loss (dB) by MST on S-band Left-polarization in equatorial coordinate system

进一步地，通过赤道坐标到地平坐标的变换[10]，图 5 中的遮挡效应转换成为图 6 的形状，清晰可见 20 m 天线和远处丘陵的轮廓，图 6 右上角为从 3 m 天线看向 20 m 天线的实景图。图 7 在 2017~2020 年 3 m 太阳射电望远镜跟踪观测太阳的所有轨迹上叠加了观测被遮挡的位置，从占比看，遮挡对 3 m 太阳射电望远镜观测时效影响较小。

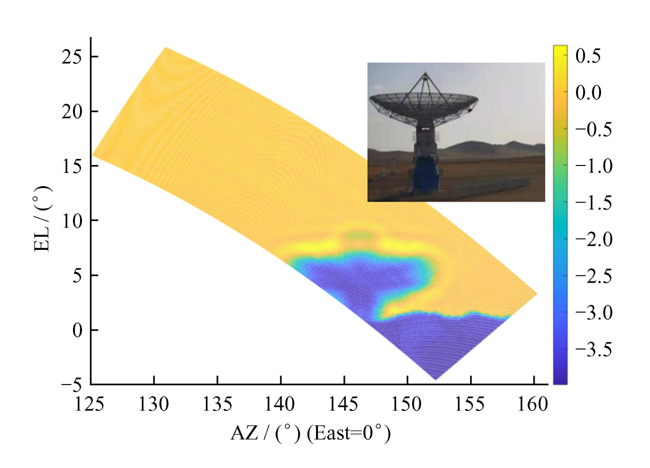


图 6　3 m 太阳射电望远镜观测的地平坐标系下 S 频段左旋极化的遮挡损耗(右上角：从 3 m 太阳射电望远镜看向 20 m 天线现场照片)

Fig. 6　Observed diffraction loss by MST on S-band Left-polarization in horizontal coordinate system, with site photo on top-right

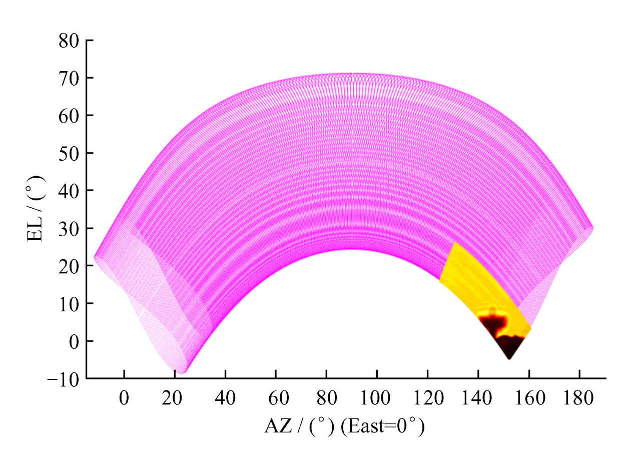


图 7　地平坐标系下叠加了遮挡效应的 2017~2020 年太阳轨迹

Fig. 7　Solar orbits in horizontal coordinate system between 2017-2020 with observed shadowing effect on bottom right

用等高线图(32 层)来进一步分析地平坐标系下 3 m 太阳射电望远镜 3 频段双圆极化的遮挡效应特征，见图 8，上下两排对应左旋和右旋极化的遮挡效应无显著区别。左中右三列对应 S/C/X 频段。按遮挡变化特征划分 3 个区域：天线区、大气区和丘陵区。天线区遮挡主要是绕射，随频率升高而降低，S/C/X 频段绕射影响方位角范围约 15°/14°/12°，遮挡损耗最大值分别高出背景约 0.6/0.4/0.1 dB，最小值则分别低于背景约 4.0/2.8/5.3 dB，从下节可看出，该最小值受接收系统噪底限制，远未到达计算的损耗值。大气区受大气吸收影响，衰减随频率升高而增加，仰角越低衰减越大，从图中可以看出，逐渐增加的层次，S/C/X 频段衰减约 0.2/0.25/1.1 dB，这与 ITU-RP-676-13 建议书[11]一致，即 20 GHz 以下大气衰减随频率升高而升高，10 GHz 时约为 0.02 dB/km，对 50 km 视距衰减约 1.0 dB，X 频段 10°仰角已有衰减。丘陵区因其距离 3 m 太阳射电望远镜和太阳源较远，绕射损耗衰减很快，变化不明显。

2　基于 ITU-R P. 526-15 建立单刃峰障碍物仿真模型和绕射损耗近似计算

2.1　原理和模型

为预测电波传播特性，ITU-R 从 1978 年开始制定，至 2019 年更新到第 15 版的 ITU-R P. 526-15 建议书，综合了理论计算绕射问题的解析解和通过实测数据总结出绕射问题规律的传播预测曲线两方面，并提供了传播中单刃峰、双刃峰和单圆形峰绕射算法。绕射损耗预测需了解障碍物和地形的工程资料，本节仅计算由 20 m 天线反射面引起的附加传播损耗。

20 m 天线相对 3 m 太阳射电望远镜接收天线的几何位置关系容易确定(见图 2)，反射面采用标准抛物面形式，由不锈钢钢丝焊成 10 mm×10 mm 网孔，约为 3 m 太阳射电望远镜最短工作波长三分之一，近似计算中忽略网面透射影响。太阳射电辐射信号直达或经 20 m 天线绕射到 3 m 天线，20 m 天线反射面边缘在视线方向厚度相对于波长也可忽略，视作尖形障碍即刀刃，反射面与周围地形之间相

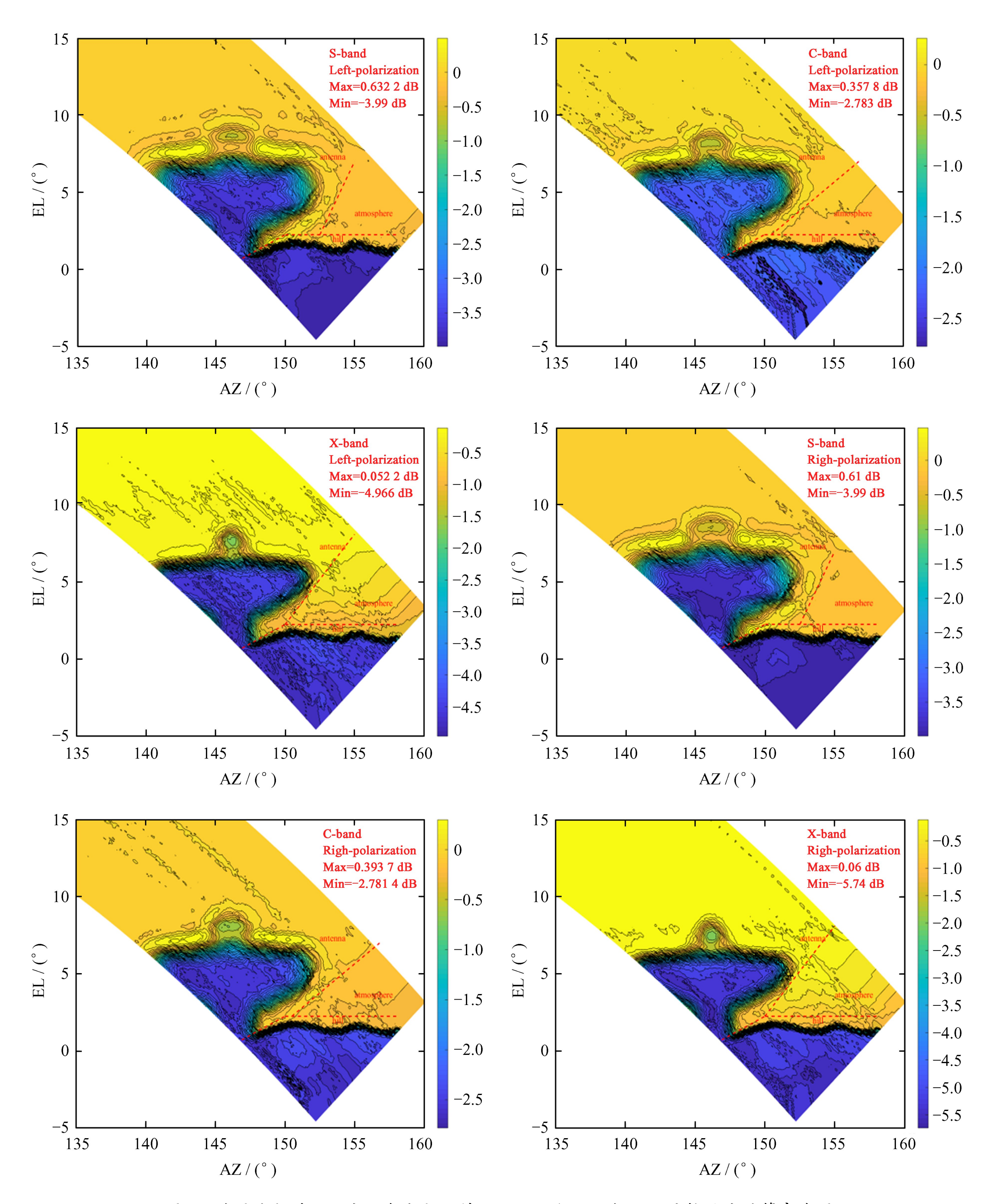


图 8　地平坐标系 3 m 太阳射电望远镜 S/C/X 3 频段双极化下遮挡效应的等高线图

Fig. 8　Contours of observed shadowing effect by MST in S/C/X 3-bands 2-polarizations in horizontal coordinate system

互影响小，沿传播路径看，20 m 天线反射面边缘上每点 B 都近似为孤立刀刃形障碍物(图 9)。设来波在边缘每一点均形成绕射，绕射损耗 $J(\nu)$ 与路径长度 d_1 和 d_2、波长 λ 及高度 h(绕射点 B 到源端 A 和接收端 R 连线的距离)有关。ITU-R P. 526-15 用综合几何参数 ν 确定它们的关系，源 A 太阳可看作无穷远，$d_1=\infty$。由 ν 求出复数菲涅尔积分 $F_c(\nu)$ 公式中正、余弦积分 $S(\nu)$、$C(\nu)$ 及 A 在 B 点的绕射损耗 $J(\nu)$[8]：

$$\nu = h\sqrt{\frac{2}{\lambda}\left(\frac{1}{d_1}+\frac{1}{d_2}\right)} \approx h\sqrt{\frac{2}{\lambda d_2}} \ , \tag{1}$$

$$F_c(\nu) = \int_0^{\nu}\exp\left(j\frac{\pi s^2}{2}\right)\mathrm{d}s = C(\nu) + S(\nu) = \int_0^{\nu}\cos\left(\frac{\pi s^2}{2}\right)\mathrm{d}s + \int_0^{\nu}\sin\left(\frac{\pi s^2}{2}\right)\mathrm{d}s \ , \tag{2}$$

$$J(\nu) = -20\log\left(\frac{\sqrt{(1-C(\nu)-S(\nu))^2+(C(\nu)+S(\nu))^2}}{2}\right) \ , \tag{3}$$

在图 10 20 m 天线反射面模型中，xy 水平面经过 3 m 天线馈源 R 点，原点 O 为 20 m 天线中心在 xy 面上的投影，天线反射面投影在 xz 面上(阴影部分)，x，y 和 z 轴分别为宽度、距离和高度，单位为 m。R 点坐标(0，−104，0)，A 点为到达 R 点的来波方向与 xz 平面交点，坐标范围(−20: 20，0，0: 15)，即计算范围为 40 m×15 m。20 m 天线焦径比 f/D=0.35，上边沿高出 R 点 10 m，B_1 和 B_2 分别为口径边缘和抛物线边缘上的绕射点，B_1 坐标(−10: 10，0，10)，B_2 坐标(x，0，z)满足

$$z = \frac{x^2}{28} + 6.43, \ x \in [-10, \ 10] \tag{4}$$

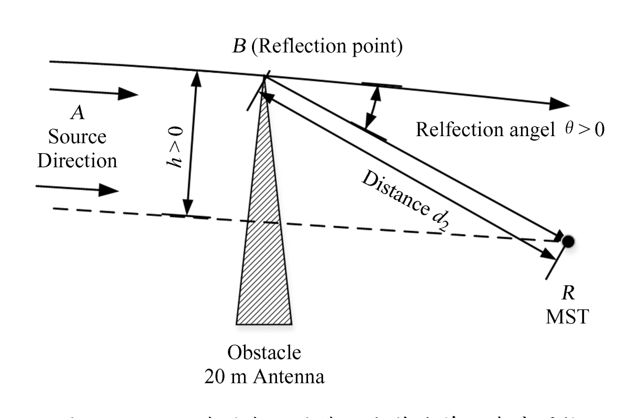


图 9 20 m 天线反射面边缘一点作为单刃峰障碍物

Fig. 9 A point on 20 m antenna reflector edge as single knife-edge obstacle

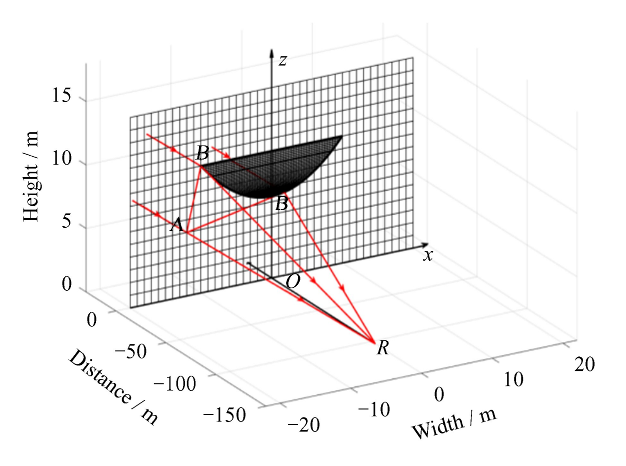


图 10 20 m 天线反射面仿真模型

Fig. 10 Simulation model of 20 m antenna reflector

将 A 方向来波沿 B_1 和 B_2 分成 m、n 份射线管，m 和 n 大小由计算步距设定。设 $j_1(\nu)$ 和 $j_2(\nu)$ 为 B_1 和 B_2 的绕射损耗真值，沿 B_1 和 B_2 取值范围对 $j_1(\nu)$ 和 $j_2(\nu)$ 进行积分，得到 R 接收 A 向来波的总最小绕射损耗 $J_{\min}$ 为

$$J_{\min} = -20\log\left(\left(\sum_1^m \frac{1}{j_1(\nu)} + \sum_1^n \frac{1}{j_2(\nu)}\right)/(m+n)\right) \ . \tag{5}$$

之后，求出图 10 中 40 m × 15 m 内所有来波方向的最小绕射损耗。如果 A 点处于抛物面投影区域范围内式 1 中 $h>0$，否则 $h<0$[8]。绕射损耗的计算量与网格大小有关。最后，须考虑 3 m 太阳射电望远镜接收天线的波束宽度。用 $M(k, k)$= 1 方柱近似 3 m 天线波束(0.2 m 网格，对 S/C/X 频段，取 k=10/5/3)，对 $J_{\min}$进行卷积得 $J^c_{\min}$，为

$$J^c_{\min} = \boldsymbol{M}(k, \ k) \otimes J_{\min}/(k*k) \ . \tag{6}$$

2.2 结果分析和讨论

图 11 第 1~5 行给出 0.2 m 网格时 $J_{\min}$局部、$J^c_{\min}$局部、$J^c_{\min}$整体、$J^c_{\min}$等高线和用同一近似波束 M(3，3)对不同频段 $J_{\min}$卷积的结果，左中右 3 列对应 S/C/X 频段。结果显示随频率提高绕射效应降低、遮挡阴影区增大，仿真和观测的趋势基本一致；$J^c_{\min}$除受综合几何参数影响外，也受工作波长和接收天线口径、即接收天线波束影响。近似波束 $M(k, k)$从第 4 行的 k=10/5/3 变为第 5 行 k=3/3/3 时，显示相同尺度障碍物对大口径天线绕射减弱、衰减更快。

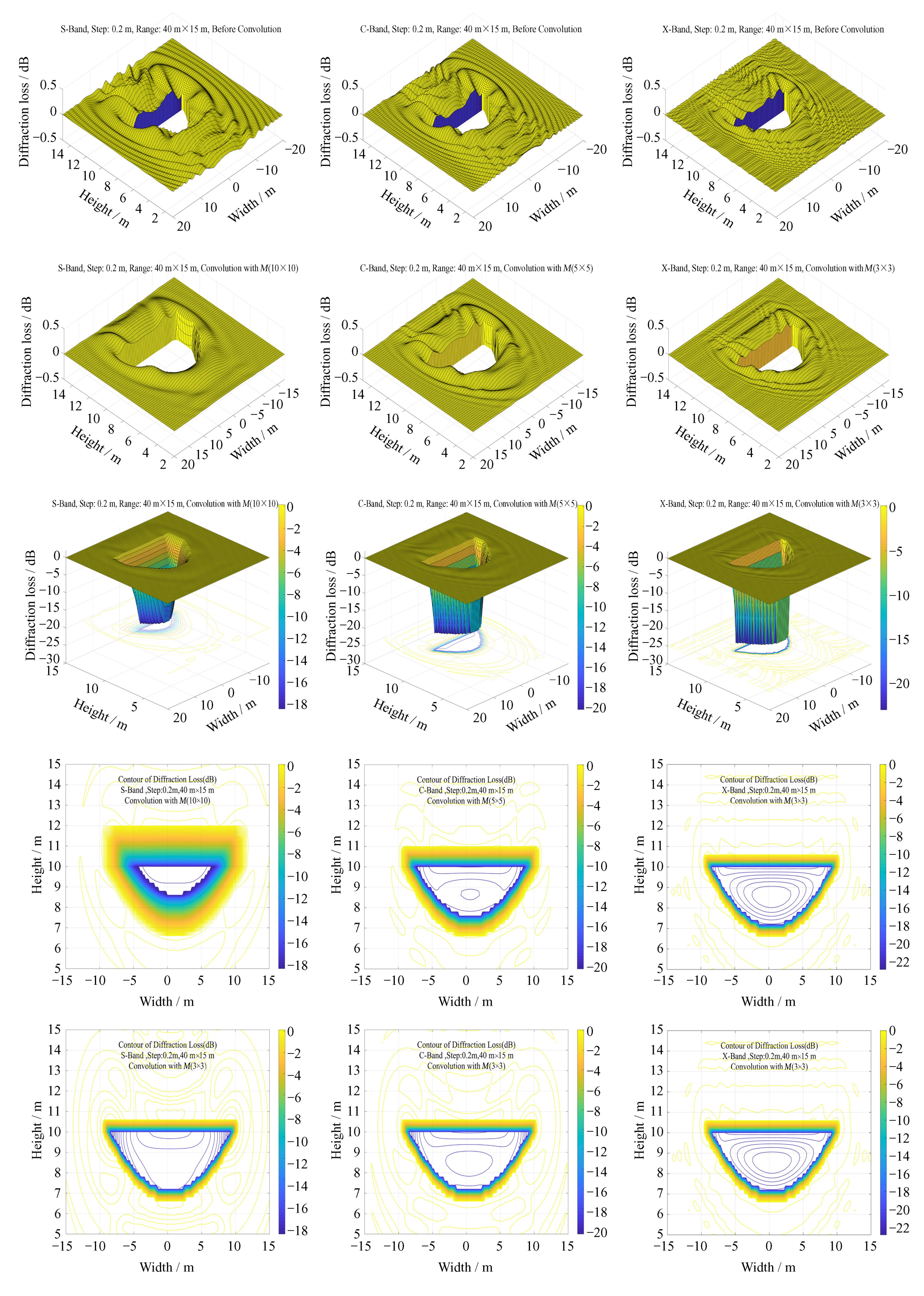


图 11　基于单刃峰障碍物模型的 20 m 天线反射面绕射损耗仿真结果

Fig. 11　Simulation results based on single knife-edge obstacle model of 20 m antenna reflector

子午工程二期位于四川稻城的太阳射电望远镜由313面6 m抛物面天线组成直径1 km的圆环阵，文[12]计算了300 MHz时相邻两单元与三单元的遮挡效应，并基于仿真结果认为在遮挡间距小于1倍波长时，相应的幅值和相位偏差可通过后期数据补偿校正。从3 m太阳射电望远镜观测和仿真结果看，数据恢复需精确确定综合几何参数、接收机动态范围、天线波束等参量。为避免天线间遮挡，下一代阿雷西博射电望远镜建设白皮书[13]概念设计中，1 112面9 m或400面15 m抛物面天线将布置在共面转动机构上，从而形成一个面积约等效于300 m口径大天线。经济条件允许并满足空间分辨率时，多天线系统也许可借鉴这样的共面结构方案。

4 结 论

由3 m太阳射电望远镜S/C/X频段太阳射电观测得到的大尺度障碍物遮挡效应为该类研究提供了一个新视角。基于ITU-R P. 526-15建议书单刃峰障碍物绕射损耗预测方法，建立20 m天线反射面仿真模型进行近似计算的结果和观测基本一致，频段间其他频点遮挡效应可由该3频段推测。遮挡效应与波长、障碍物特性及其相对源和接收天线的距离和角度、接收设备的天线波束和动态范围等有关。遮挡数据恢复要考虑多因素的限制。以太阳为辐射源、利用明安图台站将建设完成的超宽频带射电频谱仪等子午二期工程设备可为更全面研究遮挡效应、电波传播特性及地球大气特性提供更多观测依据。

参考文献：

[1] YAN Y H, CHEN Z J, WANG W, et al. Mingantu spectral radioheliograph for solar and space weather studies [J]. Frontiers in Astronomy and Space Sciences, 2021, 8: 1-13.

[2] CHEN L J, YAN Y H, FAN Q X, et al. An agile very low frequency radio spectrum explorer [J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2021, 21(4): 085.

[3] 耿立红, 谭程明, 敦金平, 等. 三频段太阳射电望远镜与空间天气 [J]. 天文研究与技术, 2018, 15(4): 380-389.
GENG L H, TAN C M, DUN J P, et al. Two new 3-bands solar radio polarimeters and spaceweather [J]. Astronomical Research & Technology, 2018, 15(4): 380-389.

[4] 耿立红, 刘东浩, 陈志军, 等. 基于立体方向图和十字跟踪扫描法校准天线指向 [J]. 电波科学学报, 2019, 34(2): 159-164.
GENG L H, LIU D H, CHEN Z J, et al. Antenna pointing calibration based on cubic radiation pattern and cross scan [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2019, 34(2): 159-164.

[5] YAN Y H, WANG W, Chen L J, et al. New interplanetary array in China for space weather [J]. Sun and Geosphere, 2018, 13(2): 153-155.

[6] 王秉中, 邵维. 计算电磁学 [M]. 北京: 科学出版社, 2018.
WANG B Z, SHAO W. Computational electromagnetics [M]. Beijing: Science Press, 2018

[7] 汪茂光. 几何绕射理论 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1994.
WANG M G. Geometrical theory of diffraction [M]. Xi'an: Xidian University Press, 1994

[8] International Telescommunications Union Radiocommunication Sector. Propagation by diffraction. Recommendation ITU-R P. 526-15 [R/OL]. (2019-11-06) [2022-09-22]. https://www.itu.int/rec /R-REC-P. 526-15-201910-I/en.

[9] GENG L H, TAN C M, YAN Y H, et al. Correction of the temperature effect in calibration of a solar radio telescope [J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2021, 21(6): 147.

[10] W. N. 克里斯琴森，J. A. 霍格玻姆. 射电望远镜［M］. 北京：科学出版社，1977.
CHRISTIANSEN W N，HGBOM J A. Radio telescopes［M］. Beijing：Science Press，1977.

[11] International Telescommunications Union Radiocommunication Sector. Attenuation by atomospheric gases and related effects. Recommendation ITU-R P. 676-13［R/OL］.（2022-08-24）［2022-09-22］. https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P. 676-13-202208-I!! PDF-E. pdf.

[12] 路光，王冰，陈耀，等. 稻城太阳射电望远镜（DSRT）天线遮挡效应仿真［J］. 空间科学学报，2022，42(2)：294-306.
LU G，WANG B，CHEN Y，et al. Simulations of the antenna-shielding effect of the Daocheng Solar Radio Telescope（DSRT）［J］. Chinese Journal of Space Science，2022，42(2)：294-305.

[13] ROSHI D A，APONTEL N，ARAYA E，et al. The future of the Arecibo-Observatory：the next generation arecibo telescope，White Paper，ver 2. 0［R/OL］.（2021-02-01）［2022-09-22］. http://www.naic.edu/ngat/NGAT/NGAT_WhitePaper_v2_01022021.pdf.

Solar Radio Observing and Simulation of Shadowing Effect

Geng Lihong[1]，Su Cang[1]，Du Jing[1]，Liu Donghao[2]，Yan Yihua[1]，Chen Linjie[1]，Wang Wei[1]
(1. State Key Laboratory of Space Weather，National Space Science Center，CAS，Beijing 100190 China，
Email：genglihong@nssc.cac.cn；2. Key Laboratory for Exploration in the Moon and Deep Space，
National Astronomical Observatories，CAS，Beijing 100101 China)

Abstract：Shadowing effects is one of the main consideration factors in designing complex system with multiple antennas. There will be 373 sets of antennas in Mingantu Station，after completing the construction of the program Meridian II equipment of National Major Science and Technology Infrastructure. Limited by test site，model complexity and computation，shadowing effect is usually hard to measure and to predict especially for electrically large-size structures. The observed solar radio data on S/C/X bands between 2017 and 2020 by MST（Mingantu Solar Radio Telescope），present the shadowing effect with the 20 m antenna and remote hills as obstacles. The observed data with shadowing effect can be divided into antenna area，atmosphere area and hills area with different shadowing characteristics. Based on the prediction method of single knife-edge diffraction loss recommended by ITU-R P. 526-15，a model of 20 m antenna reflector is built，the shadowing effects on S/C/X-bands are simulated，and the results show agreement with those of observation. From simulation and observing results，shadowing effects are related with wavelength，obstacle character，distance and angle among obstacle，source and receiving antenna，the receiving antenna's beam，and dynamic range of receiving system，etc.

Key words：shadowing effect；solar radio observing；Meridian II program；ITU-R P. 526-15；diffraction loss